Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
der Freien Universität Berlin
und aus der Biophysikalischen Abteilung
(Leiter: Professor Dr. med. dent. Hans Lenz)
des Institutes für Kariesforschung e.V. Berlin

ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR FRAGE DER MILCHZAHNRESORPTION

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der ehem.
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

1970

vorgelegt von
Klaus Schwinge
aus Zimpel-Tauer

Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-,Mund- und Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
und aus der Biophysikalischen Abteilung
(Leiter: Professor Dr. med. dent. Hans L e n z)
des Institutes für Kariesforschung e.V. Berlin

ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR FRAGE DER MILCHZAHNRESORPTION

INAUGURAL - DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der ehemaligen
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Klaus S C H W I N G E
aus Zimpel-Tauer

Ehemaliger Dekan: Professor Dr. med. Herbert L a x

Referent: Professor Dr. med. dent. Hans L e n z

Korreferent: Professor Dr. med. Willy S c h w a r z

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der ehemaligen Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin.

Promoviert: am 28. 7. 1970

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

		Seite
I.	Einleitung	1
II.	Literaturübersicht	3
III.	Material und Methode	16
IV.	Ergebnisse	20
V.	Diskussion	34
VI.	Zusammenfassung	45
	Literaturverzeichnis	47

I. EINLEITUNG

In vielen Gebieten der Zahnheilkunde spielt bei zahlreichen physiologischen und pathologischen Prozessen das Problem der Resorption von Hartgewebe eine wichtige Rolle. So kommt es im Verlauf des Wachstums durch permanente Umbauvorgänge, d. h. Bildung und Resorption von Hartsubstanz, zur funktionellen Ausformung der Kiefer. In der Kieferorthopädie wird die Umbaufähigkeit des Gewebes therapeutisch ausgenutzt, um Gebiß- und Kieferanomalien zu beseitigen. Abbauvorgänge findet man bei pathologischen Erscheinungen; es sei hier auf die Resorption von Knochengewebe bei granulomatöser Gewebsproliferation und Tumorenbildung hingewiesen. Deutlicher steht die Resorption von Hartsubstanz bei der Gebißentwicklung im Vordergrund; denn während der Zahnwechselperiode ist die Resorption der Milchzahnwurzel eine der Voraussetzungen für das Nachrücken der bleibenden Zähne.

Von diesem Grundproblem der Milchzahnresorption wurden in den letzten Jahrzehnten bei einer größeren Anzahl von Untersuchungen die Gewebselemente dargestellt, die an der Resorption beteiligt sind. Da

diese Untersuchungen vorwiegend am Lichtmikroskop durchgeführt wurden und auf Grund des Auflösungsvermögens des Lichtmikroskopes die Gewebsstrukturen nur bis zur Größenordnung von 0,1 - 0,2 µ darstellbar sind, blieb die Ultrastruktur größtenteils ungeklärt. Daher ist es auch verständlich, daß abweichende Auffassungen über das Grundproblem der Milchzahnresorption veröffentlicht wurden. Erst in jüngster Zeit wurden elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Ultrastruktur des Resorptionsprozesses durchgeführt. Es liegen nur vereinzelte Arbeiten vor, die erste Ergebnisse zur Klärung des Problems aufweisen.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit soll sein, die bisherigen Untersuchungen im Resorptionsbereich des Milchzahnes zu erweitern und zu ergänzen.

II. L I T E R A T U R Ü B E R S I C H T

Die Frage nach dem Verlauf der Milchzahnresorption und den Einflüssen auf diesen physiologischen Prozeß war häufig Anlaß zu Untersuchungen, die eine maßgebliche Deutung und Klärung des Problems bringen sollten. Bereits 1771 erwähnt HUNTER (zit. n. LEHNER, PLENK (22)) den Abbau der Milchzahnwurzeln als Voraussetzung für den Verlust bzw. das physiologische Ausfallen der Milchzähne. Dieser klinische Befund führte zu Diskussionen über den Resorptionsmechanismus. Eine Einsicht in den naturgemäßen Vorgang ermöglichten jedoch erst die histologischen Untersuchungen mit dem Lichtmikroskop. A. RETZIUS (1837, zit. n. LEHNER (22)) folgerte aus seinen Untersuchungsergebnissen, daß das Zahnsäckchen der Ersatzzahnleiste eine Auflösung der Milchzahnwurzel bewirke. ROUSSEAU (1839, zit. n. LEHNER (22)) vermutete dagegen, daß der Ersatzzahn dem Milchzahn die Nahrung absperre und sich daraus eine Atrophie der Milchzahnwurzel ergebe.

Erst die Untersuchungen von LINDERER, TOMES (zit. n. KRONFELD (21)), KÖLLIKER (20) waren richtungweisend für die Klärung der Milchzahnresorption. LINDERER entdeckte am Milchzahn die Resorptionslakunen, die heute in Analogie zum Knochengewebe als HOWSHIP'sche Lakunen bezeichnet werden. Sie stellen gruben- oder buchtenförmige Vertiefungen im Bereich

der Resorptionszone dar. TOMES beobachtete in diesen Lakunen Zellhaufen und Riesenzellen. KÖLLIKER (20) bestätigte die Ergebnisse und wies auf die Bedeutung dieser Zellen bei der Resorption hin; er nannte sie entsprechend ihrer Funktion Osteoklasten. Wegen ihrer Beziehung zum Zahn wurden die Zellen später Odontoklasten genannt.

Die detailliertere Darstellung dieser und weiterer Gewebselemente war Ziel nachfolgender Untersuchungen. Die Zellen wurden als mono- und polynukleare Elemente beschrieben, die entlang der Hartsubstanzgrenze gelagert sind (HOPEWELL-SMITH (15), KÖLLIKER (20), KRONFELD (21)).FISCHER (6) stellt einen weiteren wesentlichen Gewebsanteil bei seinen Untersuchungen an Tieren in den Vordergrund. Er untersucht die Vascularisierung im Bereich der Resorptionszone und stellt dichte Kapillargeflechte in den Resorptionsbuchten fest. Dabei beschreibt er ein " resorbierendes Gefäßnetz in Gestalt bohrender Gefäße, die die soliden Lamellensysteme der Knochen- und Dentinsubstanz durchdringen".

Mit den genannten Arbeiten waren wesentliche Gewebselemente des Resorptionsgebietes gefunden und dargestellt worden. Über den Ablauf des Abbauvorganges in einzelnen Phasen finden sich schon bei TOMES (zit. n. KRONFELD (21)) Angaben. Er er-

wähnt 1876 die Tatsache, daß nicht ein kontinuierlicher Abbau der Milchzahnwurzel erfolgt, sondern eine Absorption mit einer Deposition von knöchernem Gewebe abwechselt. Dieser Wechsel von Resorptions- und Reparationsphasen wurde von anderen Autoren bestätigt (KRONFELD (21), FURSETH (7)).

Bei lichtmikroskopischen Untersuchungen blieb jedoch der Einblick in die unmittelbare Kontaktzone von Zelle und Hartsubstanz verwehrt, so daß nur Gewebsübersichten beurteilt werden konnten. HARNDT (13) definierte bei seinen Untersuchungen zwei Formen der Resorption, er unterschied zwischen einer lakunären und einer glatten Resorptionslinie und vermutete, daß beiden Formen spezielle Zellelemente entsprechen.

Einen wesentlichen Diskussionspunkt stellte in den meisten Veröffentlichungen die Lokalisation der Resorption dar, ganz besonders im Zusammenhang mit dem zeitlichen Ablauf. KRONFELD (21) resümiert in seinen Arbeiten, daß die Resorption zwar am häufigsten am Berührungspunkt des bleibenden Zahnes mit dem Milchzahn beginnt, der Abbau aber häufig auch an anderen Stellen gefunden wird. Bei HOLEWELL-SMITH (15) und HARNDT (13) lassen sich ebenfalls keine Angaben über eine definitive Ausgangsstelle der Resorption finden. Es besteht auch keine Übereinstimmung über allgemeine Richtlinien oder Gesetzmäßigkei-

ten, nach denen sich alle Resorptionserscheinungen im Wechselgebiß einordnenlassen. Eine Angabe wurde allerdings immer wieder bestätigt: erste Resorptionsanzeichen finden sich am häufigsten an der dem bleibenden Zahn nächst gelegenen Stelle (KRONFELD (21), HOPEWELL-SMITH (15), HARNDT (13), MEYER (27) et al.). Diese Tatsache veranlaßte die meisten Autoren zu der Annahme, daß die Durchbruchsrichtung des bleibenden Zahnes und damit ein entsprechend ausgeübter Druck entscheidend für die Lokalisation des Resorptionsbeginnes ist (KRONFELD (21), HARNDT (13), FISCHER (6),BHASKAR (2)). Die Untersuchungen von OBERSZTYN (30)beweisen, daß der Druck auf den zeitlichen Ablauf Einfluß hat. Einmal konnte er durch Entfernen des Ersatzzahnkeimes eine Verlangsamung der Resorption nachweisen und eine Verstärkung dieses Effektes feststellen, wenn der Kaudruck durch eine Brückenschiene abgefangen wird. Diese Untersuchungen scheinen die Annahme von NENNINGER (29) zu bestätigen, daß zwei "Belastungsmechanismen mit synergistischem Effekt" existieren: die direkte Einwirkung über den nachrückenden Zahn und der indirekte Druck beim Schlußbiß über die Zahnkrone. Die Druckwirkung über den Schlußbiß scheint zwar einen Einfluß auf die Resorption zu nehmen, kann aber sicherlich kein ausschlaggebender Faktor sein, da dieser Reiz gleichzeitig auf das gesamte Gebiß ausgeübt wird. Andere Autoren weisen dar-

auf hin, daß der Druck nicht allein ausschlaggebend sein kann, da häufig Spontanresorptionen an Milchzähnen ohne Ersatzzahn beobachtet wurden.

FISCHER(6) mißt den von ihm in umfangreichen Untersuchungen dargestellten Kapillarnetzen besondere Bedeutung bei. Er sieht die lokale Reaktion eines zentral gesteuerten Vorganges in einer Gefäßproliferation mit entsprechender Hyperämie. Er schreibt: " Dichte Kapillargeflechte mit zahlreichen Osteoklasten und Riesenzellen dringen an der Zahngrenze vor, dieselbe buchtig ausnagend ". Der Autor folgert aus seinen Untersuchungen, daß das Gefäßnetz während des gesamten Resorptionsprozesses die führende Stellung behaupte und als eigentlicher Träger desselben betrachtet werden müsse.

Einen weiteren Diskussionspunkt stellt in verschiedenen Veröffentlichungen die Beteiligung der Pulpa am Resorptionsvorgang dar. Im gleichen Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Abhängigkeit der Resorption von der Vitalität der Pulpa. KRONFELD (21) schließt eine Resorptionsaktivität der Pulpa zumindest für den normalen Abbau aus. Diese Auffassung wird von HARNDT (13) und ZEROSI (36) geteilt. Die Autoren bleiben bei dieser Ansicht, obwohl sie bei umfangreichen Tierversuchen eine Beteiligung der vitalen Pulpa beobachtet haben. MENNINGER (29) vertritt

dagegen die Meinung, daß die physiologische Resorption nur solange möglich ist, wie das Leben der Milchzahnpulpa erhalten bleibt. WEATHERELL (35) und HARGREAVES (35) fanden Zeichen von Resorption der Pulpaoberfläche an den meisten untersuchten normalen Zähnen, besonders bei Molaren. GJÜLEWA (8) behauptet, daß die Resorption bei entzündlichen Veränderungen ausschließlich von der Pulpa ausgeht.

Eine Reihe von Untersuchungen befaßt sich mit der Auswirkung sekundärer Einflüsse auf die Resorption. Dabei werden vor allen Dingen traumatische Schädigungen und Infektionen in Betracht gezogen. In der Literatur wurden aber teilweise abweichende Ergebnisse über die Auswirkungen sekundärer Einflüsse hinsichtlich einer Intensivierung oder Verlangsamung des Resorptionsprozesses angegeben. Über die Einwirkung von Stoß und Schlag werden gleiche Folgeerscheinungen beschrieben: als Antwort auf eine von außen einwirkende unphysiologische Kraft ist die beschleunigte Resorption der Milchzahnwurzel anzusehen (NENNINGER (29), OBERSZTYN (30) et al.). Dagegen haben sich über den Einfluß von entzündlichen Prozessen und Infektionen auf die Resorption widersprechende Ansichten durchgesetzt, die auch heute noch nicht eindeutig abgegrenzt sind. HARNDT (13) ist in seinen Untersuchungen zu dem Ergebnis gekommen, daß bei pathologischen Vorgängen die

Pulpa aktiviert und die gesamte Resorption im Sinne einer Intensivierung beeinflußt wird. GREULICH (10) und OBERSZTYN (30) gelangen zum gleichen Ergebnis. Allerdings ist diese Intensivierung nur auf pulpitische und periodontitische Veränderungen beschränkt, bei gangränösem Zerfall der Pulpa und der Infizierung des Dentins ist ein Sistieren der Resorption zu verzeichnen. KARWETZKY (17) schreibt dagegen: "Die pathologische Resorption der Milchzähne, einer Gangrän entstammend, erstreckt sich mit der Auflösung des alveolären Knochens über grosse Strecken der Milchzahnwurzeln, die nicht selten schon nach vier bis sechs Monaten in vollem Umfang eingeschmolzen sind". Es sind also sowohl beschleunigte Resorption als auch deren völliger Stillstand mit Ausstoßen des gesamten Milchzahnes beobachtet worden. Hier erscheint die genaue Definition erforderlich, ob bei pathologischen Erscheinungen überhaupt von einer physiologischen Resorption im Sinne eines gesteuerten aber sekundär beeinflußten Wurzelabbaues gesprochen werden kann.

Die unterschiedlichen klinischen Beobachtungen und histologischen Untersuchungsergebnisse führen zurück zur Frage nach dem eigentlichen Grundvorgang, der bei der Resorption abläuft. Die Fähigkeit des Organismus', zu bestimmten Zeitpunkten und innerhalb einer gewissen Zeitspanne Hartsubstanzgebilde wie die Milchzahnwurzel durch Resorption zu eliminieren, läßt einerseits

die Fragen nach einer eventuellen Steuerung und den auslösenden Faktoren stellen, andererseits wirft dieses Phänomen die Frage nach dem Mechanismus des Vorganges auf.

Bisher konnte nicht nachgewiesen werden, ob dieser Abbau der Milchzahnwurzeln zentral gesteuert wird. Es steht jedoch fest, daß die Wurzeln dem Rhythmus des Zahnwechsels entsprechend abgebaut werden, wobei Abweichungen und Störungen auf Grund pathologischer Veränderungen auftreten können. Als Dauer des Prozesses werden für den menschlichen Organismus etwa zwei Jahre angegeben.

Die Bedeutung der Odontoklasten für die Resorption der Milchzahnwurzel ist heute unbestritten. Neueste Untersuchungen (BOGNAES (34), FURSETH (7)) haben diese Funktion der Zellen durch elektronenmikroskopische Untersuchungen zu klären versucht. So erweitert FURSETH (7) durch seine Arbeiten wesentlich die Kenntnisse der Struktur. Er beschreibt lange cytoplasmatische Ausläufer, die der Zelle ein sternförmiges Aussehen geben. Diese Ausläufer bilden die sogenannte " ruffle border" . Die "ruffle border" ist zusammengesetzt aus cytoplasmatischen Falten, die ein System von 2-3 µ tiefen Kanälen bildet.

Es gilt nun, nicht nur diese Ergebnisse zu bestätigen, sondern vor allen Dingen die Hypothesen des Abbaumechanismus zu klären. Wie bereits er-

wähnt, sieht FISCHER (6) die Reaktion auf eine mögliche zentrale Steuerung in einer übermäßigen Vascularisierung im Bereich der Resorptionszone und folgert daraus: "Das Gefäßsystem behauptet während des gesamten Auflösungsprozesses die führende Stellung und muß als der eigentliche Träger desselben betrachtet werden." Aus den Gefäßendothelien bilden sich Odontoklasten und Riesenzellen. Letztere stellen Resorptionsorgane dar, die, auf einer gewissen Entwicklungshöhe angelangt, unter atrophischen Erscheinungen zu Grunde gehen.

Über die Herkunft der Odontoklasten bzw. Osteoklasten herrscht auch heute noch Unklarheit. Es werden in der Literatur die verschiedensten Anschauungen vertreten. Einen ebenfalls ungeklärten Punkt stellt die Frage der Differenzierung und Aktivierung dar. Neben der Zentralsteuerung werden lokale mechanische und chemische Veränderungen als auslösende Faktoren in Betracht gezogen. Durch Abtrennung des Gewebes könnte z. B. ein chemischer Reiz zu einer Art Zellinduktion führen (EGGERS-LUKA (4)).

Über den Resorptionsprozeß finden sich in der Literatur ursprünglich zwei maßgebliche Hypothesen: a) die [illegible]'sche Theorie, die als eine Art zellbedingte Phagozytose definiert wurde und b) die v. RECKLINGHAUSEN'sche Theorie, bei der die Auflösung

der Kalksalze durch aktive humorale Prozesse angenommen wurde. Die erste Theorie setzt das Vorhandensein zelliger Elemente voraus, die zweite dagegen stützt sich auf die Annahme aktiver enzymatischer Vorgänge. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, daß bei einer biochemischen Betrachtung die Trennung zwischen aktiver und passiver Resorption keine praktische Bedeutung hat, denn vermutlich liegt bei beiden histologischen Bildern ein enzymatischer Mechanismus zu Grunde (EGGERS-LURA (4)). Andererseits sollen die Odontoklasten durch Säureeinwirkung die Resorption des mineralisierten Gewebes bewirken und durch enzymatische Tätigkeit die zurückgebliebenen Anteile auflösen. KÖLLIKER (20) fordert schon 1873 ein von den Zellen gebildetes Säuremedium, das zur Knochenlösung fähig ist. Autoren, die sich dieser Auffassung anschlossen, übersahen, daß Kalksubstanzen auch alkalisch gelöst werden können, d. h. sie können Verbindungen mit basischen Gruppen (z.B. Aminosäuren) einer Reihe biologischer Stoffe eingehen. Vor allem übersahen sie, daß die komplexen Verbindungen enzymatisch angegriffen werden können (EGGERS-LURA (4)). Einen solchen möglichen Auflösungsprozeß des Knochenkalziums stellt das sogenannte "Chelations- Phänomen" dar (JENKINS und DRAWES (16)).

Nimmt man einen gleichen oder ähnlichen

enzymatischen Aufbau der Odontoklasten und der Osteoklasten an, so sind die Zellen als enzymatische Kraftzentren anzusehen, die plötzlich eine erhöhte Aktivität und Fähigkeit zur Odontolyse bekommen. Diese Auffassung von EGGERS-LURA (4) wird unterstützt und bestätigt durch histochemische Untersuchungen bei der Knochenresorption. Es konnten synthetisierende Phosphatasen nachgewiesen werden. Auch Nukleasen und Oxydationsenzyme zeigen positive Reaktionen, ebenso gelingt es HANCOX (11), proteolytische Enzyme in Osteoklasten nachzuweisen. BURSTONE (3) fand in Odontoklasten Acidphosphatase, Cytochromoxidase und Succinyldehydrogenase.

Für den Bereich der Knochenresorption liegen verschiedene Arbeiten vor, in denen besonders der Kontaktbereich von Knochensubstanz und Osteoklasten untersucht wird. Als typische Merkmale für die Aktivität der Zellen werden die "brush border" und innerhalb dieser Faltensysteme gelegene Kristalle angegeben (GONZALES und KARNOWSKY (9), HANCOX, BRIAN und BOOTHROYD (12)). FURSETH (7) stellt gleiche Ergebnisse bei seinen Untersuchungen an Odontoklasten fest. HANCOX und Mitarbeiter (12) finden außer den Kristallen regelmäßig demaskierte Kollagenfibrillen in den Cytoplasmakanälen. Studien mit Pu^{239} haben gezeigt, daß größere Mengen dieser Substanz, nach-

dem sie auf resorbierbare Oberflächen aufgebracht worden waren, im Cytoplasma lokaler Osteoklasten konzentriert zu finden waren (ARNOLD und JEE (1)). Die Autoren schlossen daraus auf eine Transformation von Knochenkomponenten in die Osteoklasten. Die von POMMER (zit. n. EGGERS-LURA (4)) definierte Phagozytose von Hartsubstanzen scheint in den Untersuchungen von HANCOX (12) eine Bestätigung zu finden. Es wurden allerdings keine direkten Aufnahmen von Kristallen oder Fasern in die Zelle hinein nachgewiesen. Er beobachtete in den Osteoklasten kleine"Vesikel", die von einer Einzelmembran begrenzt sind. Diese "Vesikel" scheinen Träger von Enzympaketen zu sein, die für die Lösung von Kollagen und Grundsubstanz benötigt werden. HANCOX und Mitarbeiter (12) folgern aus ihren Untersuchungen an Osteoklasten, daß die erste Veränderung bei der Knochenresorption die Lösung der Kristalle ist, der der Abbau des Kollagens folge. Andererseits könnten gleichzeitig anorganische und organische Substanzen gelöst werden. Ebenso ist zuerst eine Kristallösung mit einer Demaskierung der Kollagenfibrillen und der nachfolgende Abbau der organischen Matrix denkbar (FITTON-JACKSON (5)).

SOGNNAES, ALBRIGHT und FRANK (34) stellten bei ihren Untersuchungen am Milchzahn eine 0,6 µ tiefe Zone fest, in der das Hartgewebe eine deutliche

Veränderung der Ultrastruktur aufweist, die schlossen aus der geringen Tiefe auf einen gleichzeitigen Abbau von organischer und anorganischer Substanz. FÜRSETH (7) bestätigt diese Zone reduzierter Elektronendichte, aber seine Beobachtung hinsichtlich der Tiefe der Zone weicht von der Angabe SOGNNAES (34) ab; sie ist seinen Beobachtungen nach 1 µ und tiefer. Diese Angabe schränkt der Autor allerdings ein, da er die angewandte Mikroröntgenologie nicht als geeignetes Meßverfahren ansieht. FÜRSETH's (7) Untersuchungen beziehen sich hauptsächlich auf die Mineralverteilung im Resorptions- und Reparationsbereich; er zieht daraus keine Schlüsse auf die Funktion der Gewebselemente.

Der Überblick über die Literatur zeigt, daß das Problem der Milchzahnresorption aus verschiedener Sicht untersucht und bearbeitet worden ist. Über den eigentlichen Grundvorgang besteht aber weiterhin noch Unklarheit.

III. M A T E R I A L und M E T H O D E

Die Untersuchungen wurden an frisch extrahierten menschlichen Milchzähnen durchgeführt. Um besonders die Hartsubstanz- Weichgewebsgrenze beurteilen zu können, wurden Zähne verwandt, an denen etwas anhängendes Weichgewebe im Bereich der Resorptionszone zu finden war. Dabei kamen Milchzähne zur Anwendung, die aus kieferorthopädischen Gründen entfernt werden mußten oder wegen starker Lockerung extrahiert wurden. Auch Zähne mit pathologischen Erscheinungen, die eine Extraktion erforderten, wurden untersucht. Diese Zähne wiesen Infektionen über die eröffnete Pulpa auf oder zeigten Durchsetzung mit Mikroorganismen vom Periodontium aus.

Zur Fixierung wurden alle Zähne sofort nach der Extraktion in eine 5%ige phosphatgepufferte Glutaraldehydlösung gelegt. Der pH-Wert der Pufferlösung lag bei 7,3. Um einen Gewebsabriß zu vermeiden, wurden die Zähne bis zur Einbettung in Kunststoffe nicht zerteilt sondern im Ganzen weiterverarbeitet.

Die Fixierung in der Glutaraldehydlösung dauerte mindestens sechs Stunden. Dann wurden die Zähne nach folgendem Plan zuerst mit Osmiumtetraoxid nachfixiert, in steigender Alkoholreihe entwässert und schließlich über einzelne Zwischenstufen in M i k r o p a l eingebettet:

Glutaraldehyd- Osmium- Fixierung

1. Gewebe in 5%iger Glutaraldehydlösung für mindestens sechs Stunden einlegen
2. mit physiologischer Kochsalzlösung auswaschen
3. über Nacht in Phosphatpuffer für mindestens 18 Std.
4. zwei Stunden OsO_4- Fixierung
5. mit physiologischer Kochsalzlösung abspülen
6. entwässern

   5 Minuten in 50%igem ROH
   5 " " 75%igem "
   5 " " 95%igem "
   2 x 10 Minuten in abs. ROH
   1 x 30 " " " "
   überspülen mit Styrol
   3 x 30 Minuten in Styrol

7. überführen in Mikropal/Styrol- Mischung (1:1) für eine Stunde (+ Katalysator, + Beschleuniger)
8. Mikropal (+ Kat., + Beschl.) über Nacht, 24 Std. bei 20° C
9. überführen der Präparate in Gelatinekapseln, auffüllen mit Mikropal (+ Kat., + Beschl.)
10. Polymerisation 12- 36 Stunden bei 60° C

Nach 36-stündiger Polymerisation bei 60° C wurden die Blöcke maschinell in Dickschnitte von 0,6-0,7 mm Dicke zerlegt und diese Schnitte anschließend lichtmikroskopisch auf ihre Verwendbarkeit geprüft und zur Einbettung in Gelatinekapseln eingelegt. Dieses Verfahren hat sich

gut bewährt, da die Zerlegung der Zähne in einzelne Schnittserien nicht nur in technischer Hinsicht eine bessere Präparatherstellung ermöglicht, sondern es zeigte sich auch, daß mit dieser Methode eine gute Orientierung gegeben ist und somit eine gezielte Anspitzung erfolgen konnte. Außerdem ermöglichte diese Methode besonders gut die Untersuchung nicht dekalzifizierter Zähne, auf die in dieser Arbeit Wert gelegt wurde. Die Einbettung in die Gelatinekapseln erfolgte in den meisten Fällen ebenfalls in Mikropal. Um bessere Schnittvoraussetzungen für die Dünnschnitte zu erzielen, wurde in zwei Fällen eine gemischte Einbettmethode angewandt, bei der die Zähne erst in Metacrylat und dann die Dickschnitte in Mikropal eingebettet wurden. Diese Methode zeigte zwar qualitativ gleiche Ergebnisse wie die "einfache" Einbettmethode, in arbeitstechnischer Hinsicht traten allerdings Schwierigkeiten auf. Es zeigten sich Blasenbildungen und Zusammenfall der Dickschnitte, wodurch die Orientierung und Anspitzung erschwert wurde.

Nach der Polymerisation der in die Gelatinekapseln eingebetteten Schnitte wurden die Präparate unter dem Lichtmikroskop mit Rasierklingen angespitzt. Die Anspitzungen wurden entlang der Resorptionsgrenze der einzelnen Schnitte von der Außenseite des Zahnes in Richtung Pulpa bis an den Odontoblastensaum durchgeführt.

Nach der jeweiligen Anspitzung wurden mit einem LKB-Ultratom Typ 4800 A die Dünnschnitte hergestellt. Die Schnittdicke der mit einem Diamantmesser geschnittenen Präparate betrug 600- 700 Å. Als Objektträger wurden mit einem "Formvarfilm" überzogene Kupfernetze verwandt. Die einzelnen Präparate wurden dann zunächst ohne Kontrastierung untersucht, da sich bei einzelnen nachkontrastierten Präparaten im Resorptionsbereich Veränderungen der Kristallstruktur gezeigt hatten. Um die Zellelemente besser darstellen zu können, wurde jedoch nachträglich eine Nachkontrastierung durchgeführt. Dazu wurden die Netze auf einen Tropfen Bleicitratlösung (im alkalischen Milieu) für 5 Minuten aufgelegt, gewässert und dann noch 20 Minuten mit Uranylacetat angefärbt. Die Untersuchungen der Schnitte wurden an einem Siemens- Elmiskop I A bei einer Strahlenspannung von 80 KV durchgeführt. Es wurde mit 3000-40000-facher Vergrößerung gearbeitet. Zur Dokumentierung wurden die untersuchten Objekte photographisch festgehalten.

IV. E R G E B N I S S E

Die Darstellung des Resorptionsbereiches in der Übersicht ist in verschiedenen Arbeiten erfolgt. Aufgabe der Elektronenmikroskopie ist es, das Gesamtbild in seinen Einzelheiten zu ergänzen und zu vervollständigen. Die unterschiedlichen Deutungen der lichtmikroskopischen Untersuchungen erfordern gerade Untersuchungen, die über die Grenze des lichtmikroskopischen Auflösungsvermögens hinausgehen. Daraus ergeben sich zwangsläufig wertvolle Hinweise zur Klärung der Vorgänge, die bisher mit lichtmikroskopischen Methoden nicht zu ermitteln waren.

Es soll zuerst die Normalstruktur des zu untersuchenden Gewebes beschrieben werden, d. h. der Aufbau des noch nicht im Bereich der Resorption einbezogenen Dentins und anschließend die Struktur der Resorptionszone, insbesondere die Beziehung des Weichgewebes zur Hartsubstanzgrenze.

a) Normales Dentin

Das normale Dentin bildet die Hauptmasse des Zahnes und stellt auch bei der Resorption den Hauptanteil der abzubauenden Substanz, da ja der Schmelz nur in der Endphase des Prozesses Bedeutung erlangt. Bisherige Untersuchungen (LENZ (25), HELMCKE (14) u.a.) haben gezeigt, daß die Dentinmatrix aus Fibrillen besteht, die in eine homogene Grundsubstanz eingelagert sind. In engstem Zusammenhang mit den fibrillären Ele-

menten stehen die bei der Mineralisation an sie angelagerten Kristalle. Durchzogen wird die gesamte Grundsubstanz von den Dentinkanälen, die von den Odontoblastenfortsätzen ausgefüllt sind. Über die sogenannte peritubuläre Zone dieser Kanäle finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben. Einzelne Autoren beobachteten spezielle Kanalwandungen (SCOTT und WYCKOFF (33), KEIL (18)), andere konnten sich dieser Auffassung nicht anschließen (LENZ (24), HELMCKE (14)). Bei einem Vergleich dieser peritubulären Zone an Milch- und Ersatzzähnen stellten PLACKOVA, PRIBYL, STEJANEK (32) fest, daß diese Zone an Milchzähnen unregelmäßiger entwickelt ist als am Ersatzzahn. Sie soll teilweise rudimentär vorkommen, teilweise überhaupt nicht ausgebildet sein.

Die Abb. 1 zeigt die Normalstruktur einer Milchzahnregion, die noch außerhalb der Resorptionszone liegt. Es lassen sich die mineralisierten fibrillären Grundelemente und der kristalline Aufbau des Dentins erkennen. Bei den eigenen Untersuchungen konnten in diesem Bereich keine besonderen Wandformationen festgestellt werden. Es ist allerdings zu betonen, daß die kollagenen Fasern um das Kanallumen herum längs orientiert sind. Diese Tatsache läßt sich gut an einem Tangentialschnitt des Dentinkanals verdeutlichen, wie Abb. 2 zeigt.

b) Dentin im Resorptionsbereich normaler Zähne

Bedenkt man, daß der Resorptionsprozeß keinen statischen Zustand sondern ein dynamisches Geschehen darstellt, so wird sofort klar, daß man bei den Untersuchungen auf einzelne Phasen bzw. deren momentanes Bild stößt. Man kann also keinen kontinuierlichen Ablauf des Geschehens wiedergeben, sondern ist auf die Beurteilung der zeitlich verschiedenen Resorptionszustände angewiesen. Aus der Vielfalt der Beobachtungen läßt sich dann der Vorgang rekonstruieren.

Das lichtmikroskopische Bild (s. Abb.3) zeigt in der Übersicht die Resorptionsfront in einer HOWSHIP'schen Lakune und die an die Hartsubstanzgrenze angelagerten Odontoklasten. Erstere stellen bogenförmige Einbuchtungen in das Dentin dar, die je nach Ablauf der Resorption in Größenordnungen von mehreren Millimetern zu bemessen sind.

Bei der Auswertung der elektronenmikroskopischen Aufnahmen wird deutlich, daß zwar vielfältige Erscheinungsformen an der Hartsubstanzgrenze auftreten, bei der zelligen Resorption aber nur lakunäre Aushöhlungen des Dentins zu beobachten sind. Auf Abb.5 ist die Lage einer Einzelzelle an der Dentingrenze innerhalb einer Lakune zu erkennen. Jeder einzelnen Zelle entspricht mindestens eine mulden- oder buchtenförmige Aushöhlung. Die Größe dieser Lakunen liegt zwischen

10- 30 µ. Sie erstrecken sich über mehrere Dentinkanäle hin, je nach der unterschiedlichen Kanaldichte in den einzelnen Dentinabschnitten. Eine klare Abgrenzung der Odontoklasten ist wegen ihrer Gestalt schwierig, vermutlich können einer Zelle ein bis drei solcher Buchten entsprechen.

Die Untersuchung der Hartsubstanzgrenze zeigt, daß die Lakunen von einer Zone erhöhter Strahlendurchlässigkeit im Vergleich zum Normaldentin begrenzt sind. Daraus ist in diesem Bereich auf eine verminderte Mineralisationsdichte zu schließen. Auf den Abb. 4 und 5 ist diese Zone als etwa gleichmäßiges Band einer mittleren Breite von 0,5 µ zu erkennen. Bei weiterer Vergrösserung zeichnet sich in der Kristallverteilung innerhalb dieser Zone ein allmählicher Übergang der Kristalldichte vom Resorptionsrand zur normalen Dentinstruktur ab. Es sind Einzelkristalle und auch kleinere Kristallverbände vorgelagert. In geringerer Tiefe weist die geordnete Lagerung der Kristalle noch auf eine bestimmte Matrix hin, die dann im Normalbereich wieder zu erkennen ist (s. Abb. 6).

Im Gegensatz zum Normaldentin ist um die Kanallumina herum regelmäßig eine peritubuläre Verdichtung der Kristallstruktur festzustellen. Die peritubuläre Zone ragt über die eigentliche Resorptionsfront hinaus, d.h. bei räumlicher Darstellung stehen

die Dentinkanäle wie eine Art Manschette oder Röhre aus der Randzone hervor (s. Abb. 7). Die Wandung dieser Röhre zeigt eine dichtere Kristallagerung als die Normalstruktur. Abb. 8 läßt eine Fortsetzung dieser besonderen Kristalldichte und -lagerung entlang des Dentinkanals erkennen. Eine andere häufige Beobachtung verdeutlicht die Abb. 9: die Dentinkanäle sind im Bereich der Resorptionszone und darüber hinaus durch Kristalleinlagerung stark eingeengt oder obliteriert, das Lumen ist mit feinen nadelförmigen Kristallen ausgefüllt. Auffällig ist dabei, daß diese Mineralisierung der Dentinkanäle nicht bis ans äußerste Ende des Kanals reicht (Abb. 10). Diese Beobachtung läßt auf eine schnellere Entmineralisierung des obliterierten Teils der Dentinkanäle schließen. Die unterschiedlichen Demineralisationserscheinungen werden zusätzlich dadurch charakterisiert, daß die Lumenbegrenzung im bereits entmineralisierten Kanalbereich nahezu glatt bleibt im Gegensatz zu der Strukturierung der übrigen Resorptionsfront.

Mit der Frage der Veränderung anorganischer Substanz stellt sich das Problem, welchem Abbau die organische Matrix unterliegt. Es ist zu vermerken, daß kollagene Fasern innerhalb der entmineralisierten Zone nur selten zu finden waren. Bei der Mehrzahl der untersuchten Präparate waren sie

nicht nachzuweisen, bei einigen konnten jedoch vereinzelte Fasern dargestellt werden(Abb. 11).

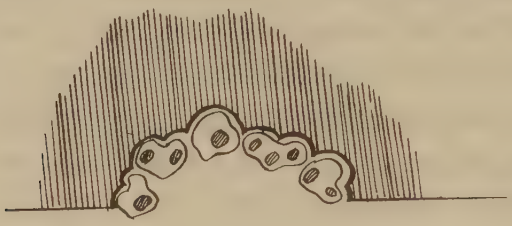
Die aufgezeigten Veränderungen im Bereich der Hartsubstanzgrenze müssen im Zusammenhang mit den resorbierenden Elementen gesehen werden, denn deren unterschiedlicher Funktionszustand gibt eine Erklärung für die Vielfalt der Erscheinungen an der Dentingrenze. Es handelt sich bei den resorbierenden Elementen im physiologischen Abbau um die von anderen Autoren beschriebenen Odontoklasten.

c) Odontoklasten

1. Lagerung und Häufigkeit des Auftretens

Die lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme (Abb. 3) zeigt die Lagerung der Zellen mit Resorptionsaktivität entlang der HOWSHIP'schen Lakunen. Sie scheinen teilweise unmittelbar an der Hartsubstanzgrenze zu liegen, teilweise etwas zum Weichgewebe hin. Das elektronenmikroskopische Bild (Abb. 3a) verdeutlicht aber, daß diese scheinbar unterschiedliche Lagerung durch die Beurteilung der sich im lichtmikroskopischen Präparat gut abzeichnenden Zellkerne vorgetäuscht ist, denn hier läßt sich eine Zellbegrenzung nicht exakt darstellen, so daß der Kontaktbereich kaum zu beurteilen ist. Die Übersichtsaufnahme deutet aber an, daß jede einzelne Zelle mindestens eine muldenförmige Aushöhlung der Hartsubstanz bewirkt. Dadurch entsteht das Bild einer

arkadenförmigen Randbegrenzung der HOWSHIP'schen Lakunen (s. Zeichnung). Das elektronenmikroskopische Bild (Abb. 5) zeigt einen Odontoklasten innerhalb einer solchen Mulde im Kontakt mit der Hartsubstanzgrenze.Die



Odontoklasten ließen sich im Resorptionsbereich regelmäßig nachweisen. Die früher beschriebene Vielkernigkeit (ein bis drei Kerne) der Zellen konnte bei den Untersuchungen bestätigt werden.

2. Zellform und -struktur

Über eine charakteristische Zellform der Odontoklasten lassen sich keine Angaben machen, da die Bilder der einzelnen Schnittserien und vor allen Dingen der verschiedenen Funktionszustände eine Vielfalt aufweisen, die eine vereinfachende Charakterisierung der Zellform nicht zulässig erscheinen läßt. Deshalb wird auf eine Charakterisierung in morphologischer Hinsicht verzichtet. Weit sinnvoller erscheint die Beurteilung der Ultrastruktur der jeweiligen Zelle, d.h. der Zellbegrenzung und der speziellen Zellorganellen der Einzelzelle. Diese Befun-

de ermöglichen Aussagen über die Aktivität und den Funktionszustand einzelner Odontoklasten, die bei der Dynamik des Prozesses nicht alle das gleiche Bild aufweisen können.

Das charakteristische Merkmal der Odontoklasten sind fingerförmige Fortsätze, die in unregelmäßigen Abständen als Ausstülpungen des Cytoplasmas von der Zelle ausgehen. Die Form der Fortsätze wechselt jedoch außerordentlich stark, so daß kein einheitliches Bild der Zelloberfläche gezeichnet werden kann. Eine Fülle von Übergangsformen zwischen der glatten Zellwand und dem in Anlehnung an das Aussehen einer Bürste als Bürstensaum (brush border) bezeichneten cytoplasmatischen Fortsätze bestimmen das Bild der Zelloberfläche. Die Abb. 11 zeigt eine relativ glatte Zellbegrenzung mit einzelnen flachen Buchten bzw. Ausstülpungen. Abb. 12 läßt dagegen deutlich ein Nebeneinander von schlanken Zellfortsätzen erkennen, die sich an die Hartsubstanz anlagern. Die weitere Vergrößerung veranschaulicht den Kontakt der Fortsätze mit der Hartsubstanz und zeigt das Eindringen eines Ausläufers in einen Dentinkanal. Die durch die Ausstülpungen gebildeten kryptenartigen Vertiefungen erweitern sich teilweise in Richtung der Zellmitte zu Hohlräumen, die aber noch zum extrazellulären Bereich zu rechnen sind.

Untereinander bilden die Zellen einen

ungeordneten aber dicht geschlossenen Zellverband. Die Interzellularräume variieren in ihrer Breite, es sind keine Verzahnungen wie im geordneten Zellverband zu erkennen. Lediglich einzelne ineinander verschlungene Fortsätze verschiedener Odontoklasten konnten beobachtet werden (Abb. 13).

Die intrazelluläre Struktur des Odontoklasten läßt einen deutlich überwiegenden Anteil an ovalen und länglichen Mitochondrien als Charakteristika erkennen (Abb. 14). Außerdem ist eine große Zahl freier Ribosomen zu sehen, die in gruppierter Form auftreten und auch als Polysome bezeichnet werden. In geringerer Zahl finden sich einzelne Hohlräume des endoplasmatischen Retikulums, sie treten als runde bis längliche Ergastoplasmasäckchen auf. Der Golgi- Apparat war bei der Untersuchung nur selten darzustellen und klein ausgebildet. Außer diesen Zellorganellen konnte zusätzlich eine große Zahl von Vakuolen beobachtet werden. Die Kernzahl der einzelnen Zellen differiert in der Schnittebene zwischen eins und drei. Ihre Form kann als rundlich bis oval beschrieben werden. Im Zellkern selbst sind mehrere Nukleoli festzustellen.

Die Verteilung der Zellorganellen über den gesamten Zellbereich ist ungleichmäßig. Besonders auffällig ist die Strukturlosigkeit des Cytoplasmas innerhalb der Fortsätze und in den an die Hartsubstanz

angrenzenden Bereichen. Diese Gebiete lassen ein homogenes nur wenig mit Vakuolen durchsetztes Plasma erkennen.

d) Resorptionszone bei pathologischen Veränderungen

Die bisher genannten Untersuchungsergebnisse wurden an Zähnen gewonnen, deren klinischer und histologischer Befund keine pathologischen Veränderungen aufwiesen. Es handelte sich dabei um Milchzähne mit physiologischer Lockerung oder um Zähne, die aus kieferorthopädischen Gründen extrahiert worden waren. Folglich ergebt sich die Frage, ob diese Befunde an Zähnen mit pathologischen Erscheinungen bestätigt werden können. Zur Untersuchung gelangten Zähne, bei denen eine Infektion vorlag. Es handelte sich einmal um Fälle, die während der Endphase der Resorption eine Besiedlung von Mikroorganismen über das Periodontium zeigten. Weitere Untersuchungen erfolgten am gangränösen Zahn, an dem nach Zerfall der Pulpa eine Durchsetzung des Dentins zu verzeichnen war.

1.) Bei der ersten Form der Infektion konnte festgestellt werden, daß im Bereich der Mikrobenbesiedlung eine Demineralisation am Dentin zu erkennen ist und zwar in einem größeren Ausmaß als bei der physiologischen Resorption. Die Tiefe der demineralisierten Zone konnte mit 2- 3 µ bemessen werden, sie ist damit deutlich breiter als die Zone im Odontoklastenbereich

(s. Abb. 15). Ein weiterer Unterschied zeigt sich in einer Zone, die dem Bereich mit verminderter Mineralisationsdichte vorgelagert ist, während die Zellen unmittelbar angelagert sind. Hier lassen sich weder Kristalle noch organische Fibrillen nachweisen. Trotzdem zeigt diese Zone eine verminderte Strahlendurchlässigkeit. Es könnte eine Phase kolloidaler Lösung der Grundsubstanz vermutet werden. Entlang dieser Zone siedeln die Mikroorganismen, allerdings nicht innerhalb dieses Bereiches. Den herausragenden Befund dieses infizierten Bereiches stellte die Tatsache des Fehlens von Odontoklasten dar, die sich an anderen nicht infizierten Stellen desselben Zahnes nachweisen ließen.

2.) Das gleiche Phänomen trat auch beim gangränösen Zahn auf (Abb. 16). Im Abbaubereich waren keine Odontoklasten zu finden. Ebenso war am gangränösen Zahn eine weit höhere Demineralisation als bei der zelligen Resorption zu verzeichnen. Diese Demineralisierung konnte am elektronenmikroskopischen Präparat nicht in ihrem gesamten Ausmaß erfaßt werden, da die Durchsetzung und die Auswirkungen der Mikroorganismen einen Bereich von 1 mm Tiefe überschritten. Abb. 16 zeigt den Zustand an der Resorptionsfront. Entlang der Hartsubstanzgrenze liegen stäbchen- und kugelförmige Mikroben, auch in den Dentinkanälen sind diese Mikroorganismen zu finden. Die Abb. 17 und 18 zeigen einen

Schnitt in einer Tiefe von 1 mm in die Hartsubstanz hinein. Auch hier konnten noch Mikroorganismen innerhalb der Dentinkanäle nachgewiesen werden. Auf der Abb. 19 sind deutliche Veränderungen um den Dentinkanal herum zu erkennen, es zeichnet sich einmal eine starke peritubuläre Zone und im Gegensatz dazu eine stark demineralisierte Grundsubstanz ab.

Die Untersuchung der Dentinkanäle am pathologischen Objekt ließ einen weiteren Unterschied zum physiologischen Prozeß erkennen. Die an der Resorptionsfläche der Wurzel endenden Kanäle waren ebenfalls eingeengt oder obliteriert, die hier gebildeten Kristalle wiesen allerdings eine andere Form auf. Es handelte sich hier um würfelförmige weit größere Kristalle als jene nadelförmigen in der physiologischen Abbauzone. Diese Kristalle gleichen den von LENZ (23) beschriebenen WHITLOCKIT- Kristallen, die im kariösen Gewebe auftreten (Abb. 20).

e) Dentin- Weichgewebsgrenze

Die Kontaktzone an der Resorptionsgrenze wird beim gesunden Zahn auf der einen Seite durch die demineralisierte Dentinzone auf der anderen Seite durch die Oberflächengestalt der Zelle charakterisiert. Während die demineralisierte Zone ein relativ gleichförmiges Aussehen zeigte (Abb. 4 und 5) und eine relativ gleich-

mäßige Tiefe aufwies, zeigten sich an der Zelloberfläche die oben geschilderten Übergänge von glatter Zellmembran bis zur Auffiederung in Form der "brush border" (Abb. 12). Die Odontoklasten lagern sich in dieser Zone unterschiedlich dicht an die Hartsubstanz an. In einigen Fällen konnte das Einwandern von Zellausläufern in die Dentinkanäle beobachtet werden (Abb. 21).

Im unmittelbaren Kontakt mit der Zelle und deren Ausläufern lagen nur noch Einzelkristalle, selten ganze Kristallverbände. Diese Kristalle waren teilweise von Cytoplasma umhüllt, ohne dabei aber in die Zelle eingeschlossen zu sein, d. h. sie lagen ausserhalb der Zelle (Abb. 12). Kollagene Fasern konnten in direktem Kontakt mit den Odontoklasten nicht beobachtet werden.

Im Gegensatz zum zellbedingten Abbau des Dentins wird in den untersuchten pathologischen Fällen (Abb. 15 und 16) das Bild durch die Bakterienbesiedlung bestimmt. Dadurch ergibt sich an der Dentin- Weichgewebsgrenze ein verändertes Bild. Es finden sich keine Odontoklasten, statt dessen lagern sich vor der Hartsubstanz die Mikroorganismen. Die demineralisierte Zone, die auch hier regelmäßig zu finden ist, variiert im Gegensatz zur physiologischen Resorption stark in der Tiefe und zeigte durchschnittlich größere Ausmaße. Es hat sich aber auch gezeigt, daß

in anderen Fällen die Mikroorganismen nicht unmittelbar an der Hartsubstanzgrenze lagen, sondern zwischen beiden Gewebsfronten noch eine Zone totaler Demineralisation zu beobachten war. Auch dieser Abbau ließ verschiedene Phasen erkennen. Ein Eindringen von Mikroorganismen in die Dentinkanäle konnte ebenfalls innerhalb des Resorptionsbereiches festgestellt werden. Dabei ist eine partielle Demineralisation in der Tiefe des Dentins zu verzeichnen gewesen.

V. DISKUSSION

Der Überblick über die bisherigen Veröffentlichungen zeigt, daß sich die Mehrzahl der Autoren mit der Beurteilung des Kontaktbereiches von Milchzahn und bleibendem Zahn befaßt. Andere untersuchen die sekundären Einwirkungen, die einen Einfluß auf den Ablauf der Resorption nehmen.

Es wurden verschiedene Ausgangspunkte für den Beginn der Resorption angegeben. Am häufigsten wurden erste Anzeichen an der dem Ersatzzahn am nächsten gelegenen Stelle gefunden, sie sind als HOWSHIP'sche Lakunen darstellbar. Diese lakunäre Aushöhlung der Resorptionsfläche des Zahnes wird durch zellige Elemente hervorgerufen. Auf Grund ihrer heute allgemein anerkannten Funktion wurden die Zellen Odontoklasten genannt. Weitgehende Unklarheit herrscht noch über die Faktoren, die den Resorptionsprozeß auslösen. Dagegen liegen zahlreiche Veröffentlichungen über die Folgeerscheinungen sekundärer Einflüsse auf die Resorption vor. So wird zwischen einer physiologischen und pathologischen Resorption unterschieden. Der Literaturüberblick zeigt, daß über den eigentlichen Vorgang, der der Milchzahnresorption zu Grunde liegt, noch klärende Untersuchungen fehlen. Hier gilt es, besonders die Ultra- und Feinstruktur im Kontaktbereich von Hartsubstanz und Weichgewebe, d. h. von Dentin und Odonto-

klasten darzustellen. Zum pathologischen Vorgang wurden Untersuchungen über die Sekundäreinflüsse durchgeführt. Es wird sowohl von einer Intensivierung als auch von einer Stimulation im Sinne einer Verlangsamung des Prozesses berichtet. Unphysiologische Druck- und Zugbelastung, Infektion oder entzündliche Reize können als solche Stimulantien angesehen werden. Diese aus klinischen, röntgenologischen und lichtmikroskopischen Untersuchungen ermittelten Ergebnisse werden wesentlich durch elektronenmikroskopische Untersuchungen erweitert (SOGNNAES (34), FURSETH (7)).

Das Elektronenmikroskop gibt die Möglichkeit, weit detailliertere Bilder zu schaffen, erfordert allerdings in arbeitstechnischer Hinsicht auf Grund der begrenzten Durchstrahlungsfähigkeit der Elektronenstrahlen besondere Präparationsmethoden. Es müssen wesentlich dünnere Objektschnitte erzielt werden als bei lichtmikroskopischen Untersuchungen. Bei den vorliegenden Untersuchungen lag die Schwierigkeit der Präparation in der exakten Wiedergabe der Hartsubstanz-Weichgewebsgrenze. Es mußten Abrisse des Weichgewebes vermieden werden, da nur dann die Möglichkeit bestand, den direkten Kontakt des Weichgewebes, besonders der Zellelemente, mit der Dentingrenze zu untersuchen. Einen weiteren zu beachtenden Faktor stellt die Mineralisationslage dar, die bei der Resorption zu beurtei-

len ist. Um den ursprünglichen Zustand möglichst wenig zu verändern, wurde von einer Dekalzifizierung der Zähne abgesehen.

An dieser Stelle erscheint eine Definition und Abgrenzung des Begriffes "Resorption" erforderlich, da sich gezeigt hat, daß er in der Literatur zwar allgemein angewandt, aber nicht erklärt wird. Es wird ein Begriff gebraucht, der sowohl den Abbau der Hartsubstanz als auch die Aufnahme der Abbauprodukte beinhaltet, so daß als "Resorption" ein dynamisches Geschehen bezeichnet wird, das nicht auf den eigentlichen physiologischen Prozeß der Resorption beschränkt ist. Als Resorption kann im physiologischen Sinn nur ein Teil des gesamten Abbauprozesses verstanden werden, d.h. die Aufnahme der Zahnsubstanz in bestimmte Organe oder Körpermedien. Diese Begriffsdefinition würde damit nicht den eigentlichen Abbau der Zahnsubstanz einschließen. Man muß berücksichtigen, daß zwei physiologische Vorgänge nacheinander ablaufen, einmal der Abbau der Hartsubstanz, zum anderen die Aufnahme der Abbauprodukte in zelluläre Organe oder ein Ablauf in umgekehrter Reihenfolge. Wenn in der vorliegenden Arbeit über den Abbau der Hartsubstanz diskutiert wird, so ist dieser Prozeß nicht dem Begriff "Resorption" gleichgesetzt, sondern als untergeordneter Teil des gesamten Geschehens aufzufassen.

Im Laufe der Untersuchungen hat sich

herausgestellt, daß eine rein morphologische Betrachtung der Gewebselemente nicht angeraten scheint, sondern eine Beurteilung nach funktionellen Gesichtspunkten sinnvoller die verschiedenen Zustandsbilder des dynamischen Prozesses erklären kann. Infolge unterschiedlicher Funktionszustände ließen sich bei den einzelnen Zellen Abweichungen erkennen, sogar der Aufbau der Einzelzelle wies kein gleichförmiges Bild auf. Dadurch lassen sich die verschiedenen Resorptionsbilder an der Hartsubstanzgrenze erklären.

Das elektronenmikroskopische Bild hat gezeigt, daß eigentlich nur von einer lakunären Form der Resorption gesprochen werden kann, da jeder Zelle eine oder mehrere Lakunen zuzuordnen sind. In der Übersicht kann sich dabei natürlich durch unterschiedliche oder gleichmäßige Aktivität der Odontoklasten ein mehr lakunäres oder lineares Bild der Randbegrenzung ergeben. Eine glatte Randbegrenzung konnte nicht beobachtet werden, es zeigte sich vielmehr eine"arkadenartige"Aushöhlung der Hartsubstanz.

Betrachtet man nun den ultrastrukturellen Aufbau der Dentinrandzone im Bereich der Odontoklasten, so ist regelmäßig eine ca. 0,5 µ breite demineralisierte Zone zu erkennen. Dieser Befund deckt sich mit den Angaben von SOGNNAES, ALBRIGHT und FRANK (34) und denjenigen von FURSETH (7).Es ließen sich jedoch inner-

halb dieser Zone im Kontaktbereich der Zellen qualitative Unterschiede beobachten. Das Verhältnis von organischer Matrix zu kristallinen Bestandteilen variierte stark. Während der kristalline Aufbau relativ gleichmäßig in der gesamten Randzone war, konnten organische Fibrillen nur wenig und vereinzelt nachgewiesen werden. Welche Bedeutung de. strukturellen Aufbau des Dentins in Bezug auf den Abbau zuzumessen ist, zeigt sich bei der Beurteilung der Dentinkanäle an der Resorptionsfront. Hier ist zu erkennen, daß die Kristallagerung Einfluß auf den Resorptionsablauf nimmt. Die Dichte der Kristalle ist durch die Längsorientierung erhöht, so daß diese Partien langsamer als andere Bereiche abgebaut werden und dadurch als die oben genannten röhrenförmigen Gebilde erscheinen.

Die systematische Untersuchung der Hartsubstanz- Weichgewebsgrenze hat ein weiteres schon von anderen Autoren (KRONFELD (21), HARNDT (13), FURSTH (7)) aufgezeigtes Ergebnis bestätigt, es fanden sich sowohl Resorptions- als auch Reparationszonen (Abb. 4 und 24). Diese An- und Abbauprozesse konnten am gleichen Zahn nebeneinander beobachtet werden. Daraus ist zu schließen, daß nicht ein allgemeiner Wechsel von An- und Abbau stattfindet, sondern ein ungeordnetes Nebeneinander dieser Vorgänge anzunehmen ist. Dieser Wechsel ist vermutlich von der Lebensdauer der einzelnen Zellen abhängig. EGGERS-LURA (4) gibt für

die Odontoklasten eine sehr kurze Zeitspanne von nur 24 Stunden bis wenige Tage an. Das würde den Abbruch der Resorptionsphase erklären. Allerdings findet sich damit keine Erklärung für die Tatsache, daß jetzt die Zellen zur Hartsubstanzbildung aktiviert werden und damit eine erneute Mineralisation bereits entmineralisierter Bereiche erfolgt. Es ist anzunehmen, daß aus der gleichen Bindegewebszelle sowohl die Odontoklasten als auch die Odontoblasten differenziert werden können.

Aus der Vielfalt der sich aufwerfenden Fragen und Probleme bei der Resorption der Milchzähne scheint der Mechanismus, nach dem der Abbau der Milchzahnhartsubstanz erfolgt, am wenigsten geklärt. Der Vergleich der einzelnen Hypothesen über den Resorptionsablauf zeigt eine allgemeine Übereinstimmung über die Bedeutung der Odontoklasten, sie werden als resorbierende Elemente angesehen. Zur Annahme von EGGERS-LURA (4), daß zwei verschiedene Resorptionsmechanismen dem Prozeß zu Grunde liegen und nebeneinander ablaufen, kann in der vorliegenden Arbeit festgestellt werden, daß nur eine zellbedingte Resorption beobachtet werden konnte. Mit der angewandten Technik war es nicht möglich, einen aktiven humoralen Abbau zu erkennen.

Die Betonung der vorliegenden Arbeit liegt daher auf der Beurteilung der Kontaktzone des Dentinrandgebietes und des angrenzenden Weichgewebes.

In der Literatur lassen sich nur wenige Angaben finden, die den Kontaktbereich am Zahn betreffen, es können aber die Untersuchungen an Osteoklasten im Knochenbereich zum Vergleich herangezogen werden, da man ähnliche oder gleiche Funktionen beider Zellarten voraussetzt. FUKUTH (7) beobachtete an den Odontoklasten die "ruffle border", die aus cytoplasmatischen Fortsätzen zusammengesetzt ist und ein Kanalsystem von 2- 3 µ Tiefe bildet. Er konnte innerhalb dieser Kanäle an undekalzifizierten Zähnen Kristalle finden.

Die cytoplasmatischen Fortsätze wurden bei den eigenen Untersuchungen ebenfalls regelmäßig beobachtet. Es zeigte sich aber, daß diese "ruffle border" nicht unbedingt in dem Bereich vorausgesetzt werden muß, in dem der Abbau erfolgt, denn die demineralisierte Zone ließ in allen Bereichen ein gleiches Bild erkennen, auch an den Stellen, an denen die Zellgrenze relativ glatt verlief. Nur selten konnten Kristalle oder Kristallverbände in dem Kanalsystem beobachtet werden. Die zwischen den Enden der Zellfortsätze oder in Mulden gelegenen Kristalle scheinen auf Grund ihrer dichteren Lagerung und damit bedingter langsamerer Lösung von dem sich weiter ausbreitenden Cytoplasma umhüllt zu sein, ohne dabei in die Zelle eingeschlossen zu werden. Andere Kristalle, die direkt in tieferen Zonen der Zellen darzustellen waren, könnten schnittbe-

dingte Absprengungen sein.

Die Ausbildung von cytoplasmatischen Fortsätzen kann vermutlich nicht der Bildung eines Kanalsystems dienen, es erscheint vielmehr sinnvoll, die Ausstülpungen als Zeichen hoher Stoffwechselaktivität anzusehen. Diese Annahme wird einmal durch die funktionelle Bedeutung der Odontoklasten unterstrichen, zum anderen zeigt das Gesamtbild der Zelle typische Merkmale hoch aktiver Tätigkeit. Beim Vergleich der Odontoklasten mit anderen Körperzellen, die ähnliche Aufgaben haben, fällt ein annähernd gleicher Aufbau auf. Wie bei den Tubuluszellen der Niere und den Darmepithelzellen bedingen die Fortsätze und Einbuchtungen eine enorme Vergrößerung der Zelloberfläche und erhöhen dementsprechend ihre Resorptionsfähigkeit. Diese Zelloberflächenvergrößerung ist zusätzlich aus anderer Sicht von Bedeutung. Die extrazelluläre Lage der Kristalle und der mikrokristallinen Aggregate, ebenso deren veränderte Gestalt sind als Zeichen für einen extrazellulären Abbau der Dentingrundsubstanz anzusehen. Für diese Annahme spricht außerdem der Aufbau der demineralisierten Zone, die einen allmählichen Übergang von Einzelkristallen über kleinere Kristallverbände zur normalen Grundsubstanz zeigt. Bei einem solchen extrazellulären Abbau würde die Zelle zu erheblicher Sekretion von Metaboliten befähigt sein müs-

sen. Die Zelloberflächenvergrößerung ließe sich daher als Ausdruck auch dieser Funktionsleistung auffassen. Aus dem Strukturbild der demineralisierten Zone könnte auf eine relativ gleichmäßige Diffusion der Lösungsmedien in die Hartsubstanz geschlossen werden.

Auch der strukturelle Aufbau der Odontoklasten weist auf eine hohe metabolitische Aktivität hin. Charakterisiert sind die Odontoklasten durch eine auffallend große Zahl von Mitochondrien. Auch freie Ribosomen ließen sich in größerer Zahl darstellen. Dagegen variierte die Anzahl der Vakuolen, die vermutlich auf einen unterschiedlichen Funktionszustand zurückzuführen war. Die Mitochondrien stellen in den Odontoklasten ebenso wie in den Osteoklasten Zentren der Energieproduktion dar. Von verschiedenen Autoren (HANCOX (11), BURSTONE (3)) sind in den Osteoklasten Enzyme nachgewiesen worden, die eine Abbauaktivität entwickeln. Es konnten in der vorliegenden Arbeit keine speziellen Zellorganellen wie die Lysosome (MERKER (26)) dargestellt werden, die solche abbauenden z.B. hydrolysierenden Enzyme enthalten. Wenn es gelänge, diese Enzyme innerhalb der Zelle zu lokalisieren und ihren Austritt aus der Zelle elektronenmikroskopisch nachzuweisen, ließen sich die von EGGERS-LURA (4) vorgeschlagenen Hypothesen zum Hartsubstanzabbau bestätigen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen läßt sich folgern, daß ein extrazellulärer Abbau und eine nachfolgende Resorption der Abbauprodukte erfolgt. Es kann dabei entweder ein gleichzeitiger Abbau von anorganischer und organischer Substanz oder ein vorausgehender Abbau der organischen Matrix mit nachfolgender Demineralisation der Kristallverbände angenommen werden. Für die letzte Vermutung spricht die Tatsache, daß sich in der Resorptionszone neben den Kristallen selten organische Fibrillen nachweisen ließen.

Der zellbedingte Abbau der Zahnhartsubstanz muß als physiologische Milchzahnresorption angesehen werden. Laut Angaben in der Literatur (KARWETZKY (17), HARNDT (13), GJÜLEWA (8)) kann der Ablauf gestört werden und zwar im Sinne einer Intensivierung und damit Beschleunigung der Resorption, aber auch im Sinne einer Verlangsamung des Prozesses. Die eigenen Untersuchungen haben ergeben, daß die Zellaktivität durch Mikroorganismen negativ beeinflußt, ja sogar verhindert werden kann. Es konnten im Bereich der Mikroorganismen keine Odontoklasten nachgewiesen werden, so daß hier ein völliger Funktionsausfall der Zellen anzunehmen ist. Trotzdem ließ sich in diesen Bereichen regelmäßig eine Demineralisation beobachten, d.h. auch hier ist ein Abbau des Dentins zu verzeichnen. Der Nachweis von WHITLOCKIT- Kristallen in

diesen Zonen deutet auf die Wahrscheinlichkeit eines kariösen Prozesses hin. Daraus ist zu schließen, daß der physiologische Abbau des Dentins bei einer Durchsetzung mit Mikroorganismen gestört oder ganz abgebrochen wird und statt dessen ein kariöser Zerfall der Zahnhartsubstanz erfolgt. Durch diesen gestörten Abbau kann die Resorption der Milchzahnwurzeln verlangsamt aber auch erheblich beschleunigt werden.

Dieses Ergebnis verdeutlicht, wie wichtig die Kenntnis des eigentlichen Grundvorganges bei der Milchzahnresorption ist. Um im Milchgebiß und während der Zeit des Wechselgebisses einen weitgehend ungestörten Ablauf der Resorption zu gewährleisten, ist eine rechtzeitige Prophylaxe angezeigt. Wenn bereits Schädigungen des Milchzahnes und des Halteapparates vorliegen, sollte genau zwischen der Funktion des Zahnes als Platzhalter und den Sekundärschädigungen abgewogen werden, die sich aus dem Verbleib eines infizierten Milchzahnes ergeben.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen an normalen und pathologisch veränderten menschlichen Milchzähnen zeigten von einander abweichende Ergebnisse im Bereich der Resorptionszone.

a) Physiologische Resorption

1. Dem Abbau der Milchzahnwurzel liegt eine Zellaktivität zu Grunde, es handelt sich bei den Zellen um die der Hartsubstanz angelagerten Odontoklasten.
2. Charakteristische Merkmale stellen die Aushöhlungen bzw. Einbuchtungen an der Hartsubstanz dar, die den HOWSHIP'schen Lakunen das Aussehen einer arkadenartigen Randbegrenzung geben. In diesen Einbuchtungen lagern die Odontoklasten.
3. Gekennzeichnet sind die Odontoklasten durch cytoplasmatische Ausläufer, ihren hohen Gehalt an Mitochondrien, die Vielkernigkeit, eine große Zahl von Ribosomen und Vakuolen.
4. An der Dentingrenze ist regelmäßig eine nahezu gleich tiefe demineralisierte Zone von 0,5 µ Tiefe zu finden. Innerhalb dieser Zone zeigt sich ein fließender Übergang von Einzelkristallen bis zur normalen Dentingrundstruktur.
5. Im Kontaktbereich von Zellen und Hartsubstanz lassen sich fibrilläre Elemente und Kristalle nur ausserhalb der Zellmembran nachweisen.

6. Die Untersuchungen führen zu der Annahme, daß ein extrazellulärer Abbau der Dentingrundsubstanz erfolgt, dem eine Resorption der Abbauprodukte angeschlossen ist.

b) Resorption der Zähne mit pathologischen Veränderungen (Besiedlung mit Mikroorganismen)

1. Die normale Resorption ist beim Befall der Hartsubstanzgrenze mit Mikroorganismen gestört. In den infizierten Bereichen sind keine Odontoklasten zu finden.
2. Trotzdem zeichnet sich an der Hartsubstanzgrenze eine Demineralisation höheren Ausmaßes als bei der normalen Resorption ab.
3. In den teilweise eingeengten oder obliterierten Dentinkanälen fanden sich die sogenannten WHITLOCKIT - Kristalle.
4. Diese Kristalle und der Nachweis von Mikroorganismen lassen auf einen kariesähnlichen Abbau des Dentins schließen.
5. Durch den Einfluß von Mikroorganismen auf die Resorption der Milchzähne wird der normale Resorptionsprozeß gestört und die Zahnsubstanz im Sinne einer kariesähnlichen Einschmelzung abgebaut.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

(1) ARNOLD, J.S. and W.S.S. JEE — Bone growth and osteoclastic activity as indicated by radioautographic distribution of plutonium. Amer.J.Anat., 101, 367-418 (1957)

(2) BHASKAR, S.N. — Bone Remodeling during Dental Eruption and Shedding. In: Mechanisms of Hard Tissue Destruction (ed. by SOGNNAES) Amer.Ass.Advanc.Sci., Washington D.C. (1963)

(3) BURSTONE, M.S. — Histochemical Observations on Enzymatic Process in Bone and Teeth. Ann.N.Y.Acad.Sci. 85, 431-444 (1960)

(4) EGGERS-LURA, H. — Die Biologie der Knochengewebe. Verlag Lege Artis, Stuttgart (1957)

(5) FITTON-JACKSON, S. — Connectiv Tissue Cells. In: The Cell (ed. by J.BRACHET, A.G. MIRSKY) Academic Press New York a. London

(6) FISCHER, G. — Die Milchzahnresorptio und der Durchbruch der bleibenden Zähne. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 68, 369-393 (1958)

(7) FURSETH, R. — The resorption of Deciduous Teeth studied by Light Mikroskopy, Microradiography and Elektronic Microscopy. Arch. oral. Biol. 13, 417-431 (1968)

(8) GJÜLEWA, P.D. — Über einige Besonderheiten der Milchzähne. Dtsch. Stomat. 16, 741 Abstr. (1966)

(9) GONZALES, F. and M.J. KARNOVSKY — Electron microscopy of osteoclasts in healing fractures of rat bone. J. biophys. biochem. Cytol. 9, 299-316 (1961)

(10) GREULICH, R.C. — Organic mass distribution in bone matrix undergoing osteoclastic resorption. Arch. oral. Biol. 3, 137-142 (1961)

(11) HANCOX, N.M.
The Osteoclast.
In: The Biochemistry and Physiology of Bone
Academic Press New York (1956)

(12) HANCOX, N.M. and B. BOOTHROYD
Structure-Function Relationships in the osteoclast.
In: Mechanisms of Hard Tissue Destruction.(ed. by SoGNNAES)
Amer. Ass. Advanc. Sci.
Washington D.C. (1963)

(13) HARNDT, E.
Milchzahnstudien. I. Die Resorption der Milchzahnwurzeln unter physiologischen und pathologischen Bedingungen.
Dtsch. Zahn-, Mund- u. Kieferheilkunde 11,12-36 (1948)

(14) HELMCKE, J.-G.
Atlas des menschlichen Zahnes im elektronenmikroskopischen Bild.
Transmare-Photo G. m. b. H. (1953)

(15) HOWELL-SMITH, A.
The Process of Osteolysis and Odontolysis or so-called "Absorption" of calcified Tissue.
Dent. Cosmos 72 (1930)

(16) JENKINS, G.N. and C. DAWES
The possible Role of Chelation in Decalcification of Biological Systems.
In: Mechanisms of Hard Tissue Destruction (ed. by SOGNNAES).
Amer.Ass.Advanc.Sci.
Washington D.C. (1963)

(17) KARWETZKI, R.
Die pathologische Milchzahnresorption mit ihrem Einfluß auf das Kauorgan.
Dtsch. Zahnärztebl.14,263-268 (1956)

(18) KEIL, R.
Über den Feinbau des normalen und krankhaften Zahnbeines nach Untersuchung im polarisierten Licht
Dtsch.Zahn-, Mund-u. Kieferheilk. 6,347-364 (1939)

(19) KLIMECKA - ZAKIEWICZA
Einfluß von Erkrankungen der Pulpa und des Parodontiums der Milchzähne auf ihre Wurzelresorption.
Czas. Stomat. 13, 729 Abstr. (1960)

(20) KÖLLIKER, A.
Die normale Resorption des Knochengewebes
Vogel, Leibzig (1873)

(21) KRONFELD,R. — The resorption of the roots of deciduous teeth. Dent.Cosmos 74, 103-120 (1932)

(22) LEHNER, J. und H. PLENK — Milchzahnresorption und Durchbruch der bleibenden Zähne. In: Handbuch der mikroskopischen Anatomie des Menschen (Hrsg.MÖLLENDORF).J.Springer Verlag, Berlin Bd. V , 3. Teil

(23) LENZ, H. — Elektronenmikroskopische Untersuchungen über Strukturen des normalen Dentins und deren Veränderung durch Karieseinwirkung. Zahnmed. Dissertation Berlin (1955)

(24) LENZ, H. — Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Dentinentwicklung Dtsch. Zahn-, Mund- u. Kieferheilk. 30, 367-381 (1959)

(25) LENZ, H. — Elektronenmikroskopische Untersuchungen zum Problem der Mineralisation, Demineralisation und Remineralisation des Zahnschmelzes. Dtsch. zahnärztl. Z. 24,460-472 (1969), (Kariesheft)

(26) MERKER, H.-J. — Lysosome eine neue Zellorganellgruppe. Berliner Med. 15, 237-244 (1964)

(27) MEYER, W. — Lehrbuch der normalen Histologie und Entwicklungsgeschichte der Zähne des Menschen. Carl Hanser Verlag, München (1951)

(28) MÜLLER-WACHENDORFF,R. — Unvollständige Wurzelbildung. Dtsch. zahnärztl. Z. 16, 1359-1364 (1961)

(29) NENNINGER, H. — Über den Abbau der Milchzahnwurzel. Zahnärztl. Welt 67,596-600 (1966)

(30) OBERSZTYN, A. — Experimental investigation of factors causing resorption of deciduous teeth. J. dent. Res. 42, 660-674 (1963)

(31) OMAN, B. — Resorption and Repair on the Surface of the Root. J. Amer. dent. Ass. 15,1768-1777 (1928)

(32) PLACKOVA, A.
J. PRYBIL und
J. STEPANEK
Eine elektronenmokroskopische Studie der Dentinstruktur.
Dtsch. zahnärztl. Z.
14, 1010-1013 (1959)

(33) SCOTT, D. and
W. A. WYCKOFF
Elektron microscopy of human dentin.
J. Dent. Res. 29, 556-560 (1950)

(34) BOGNNAES, R. F.
J. T. ALBRIGHT and
R. M. FRANK
Elektron microscopic surface changes in lacunar resorption.
Inter. Ass. Dent. Res. Abstr.
J. dent. Res. 40, 672 (1961)

(35) WEATHERELL, J.A. and
J. A. HARGREAVES
Effect of resorption on the fluoride content of human deciduous dentin.
Arch. oral. Biol. 11, 749-756 (1966)

(36) ZERBI, C.
M. BOUYSSOU et
H. LEPP
Observations sur les resorptions dentaires.
Rech. Sci. Stomat. 4-6, (1961-1963

B I L D A N H A N G

Die Vergrößerungsangaben der einzelnen Abbildungen beziehen sich auf die elektronenmikroskopischen Originalaufnahmen.

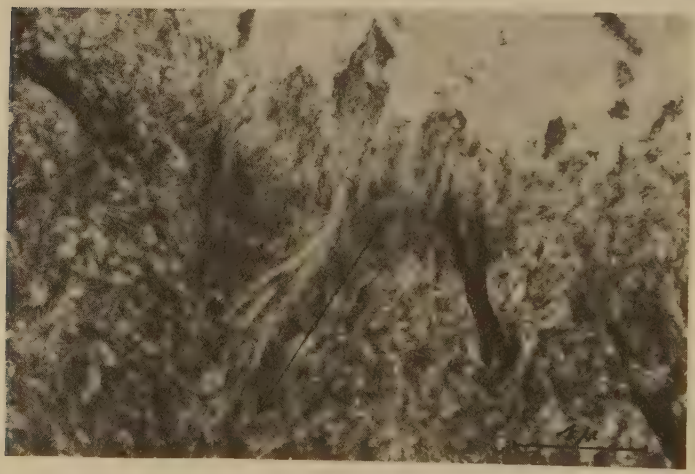


Abb. 1: Normales Dentin außerhalb der Resorptionszone, Dentinkanäle im Querschnitt.
Vergrößerung: 6000 : 1

Abb. 2: Dentingrenze mit tangential angeschnittenem Dentinkanal, längs orientierte Fibrillen (s. Pfeilrichtung).
Vergrößerung: 14000 : 1

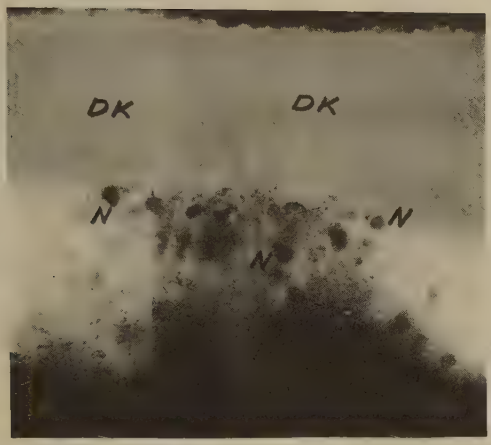


Abb. 3: Resorptionsfront einer HOWSHIP'schen Lakune mit den durch die Nuklei (N) gekennzeichneten Odontoklasten, Dentinkanäle (DK). Vergrößerung: 350 : 1

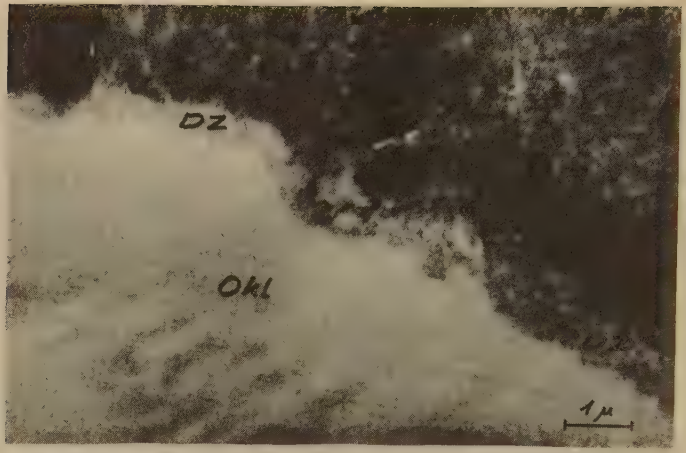
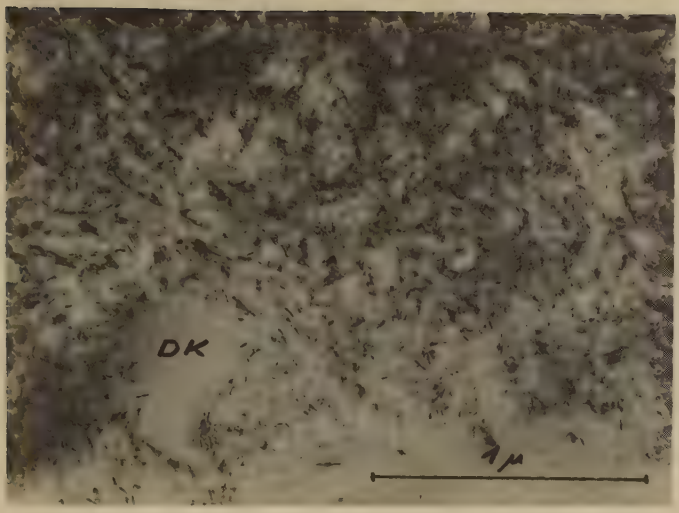


Abb. 4: Demineralisierte Zone (DZ) an der Hartsubstanzgrenze, angelagerter Odontoklast (Okl).
Vergrößerung: 4000 : 1

Abb. 5: Odontoklast innerhalb einer Lakune, deutlich sichtbare demineralisierte Zone (DZ), Zellkern (N), Dentinkanal (DK), einzelne Mitochondrien (M).
Vergrößerung: 4000 : 1



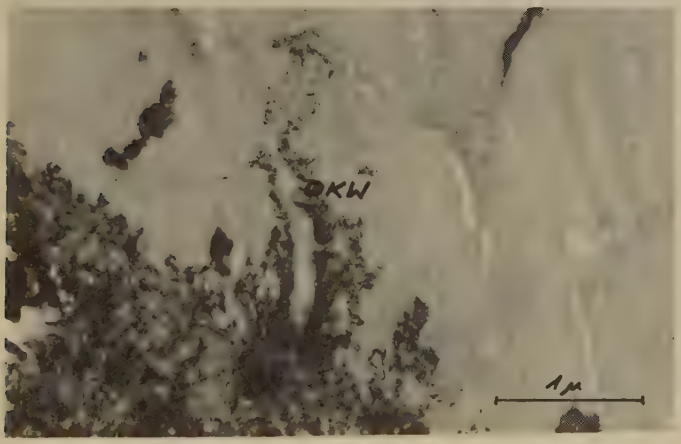
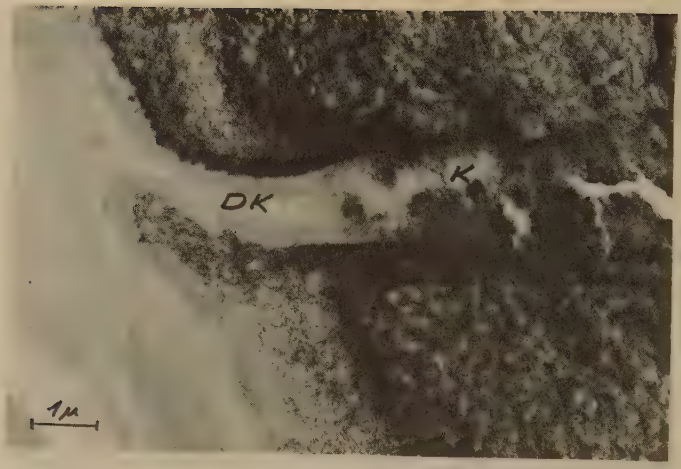


Abb. 6: Kristallverteilung innerhalb der demineralisierten Zone, Dentinkanal (DK).
Vergrößerung: 30000 : 1

Abb. 7: Vor der Resorptionsfront verbliebene Dentinkanalwandung (DKW).
Vergrößerung: 16000 : 1



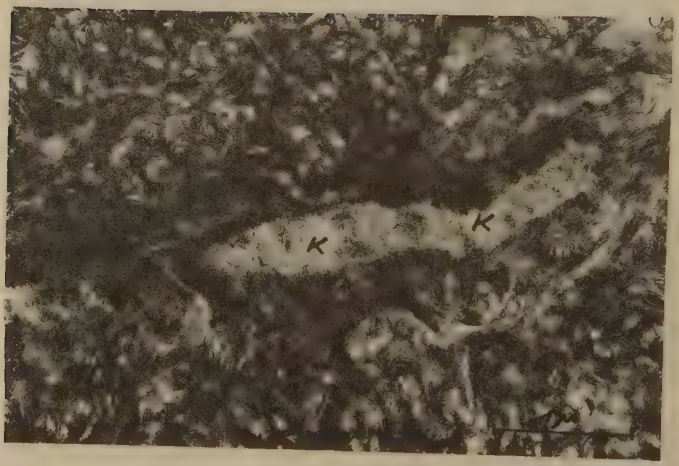
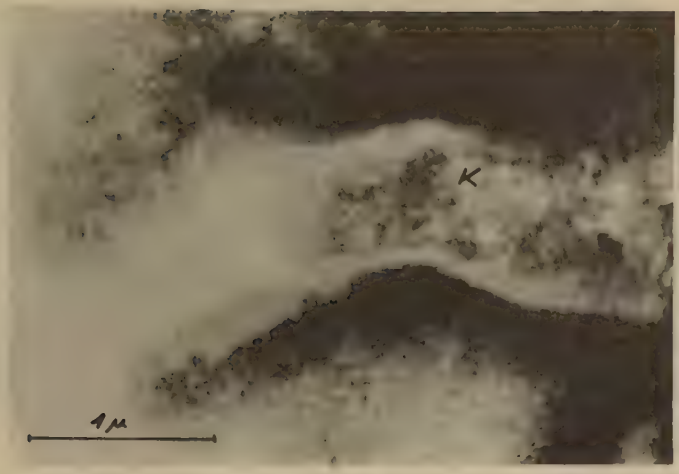


Abb. 8: Längsschnitt eines Dentinkanals an der Resorptionsfront (DK), ursprüngliche Kanalwand (DKW), Einlagerung von Kristallen ins Kanallumen (K).
Vergrößerung: 7000 : 1

Abb. 9: Dentinkanal schräg angeschnitten, Kristalleinlagerung (K), (s. auch Abb. 10).
Vergrößerung: 15000 : 1



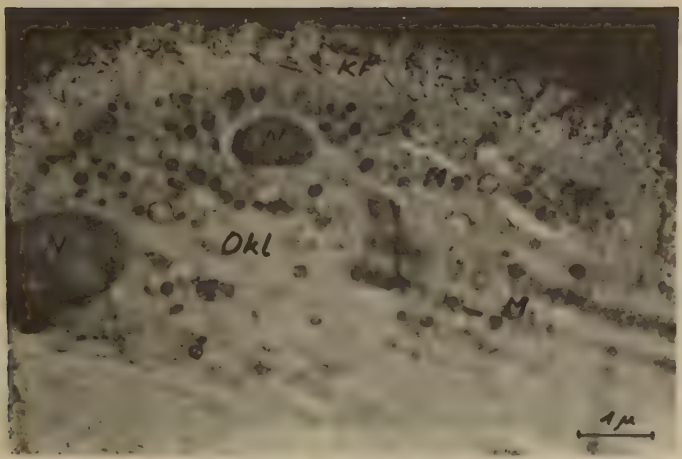
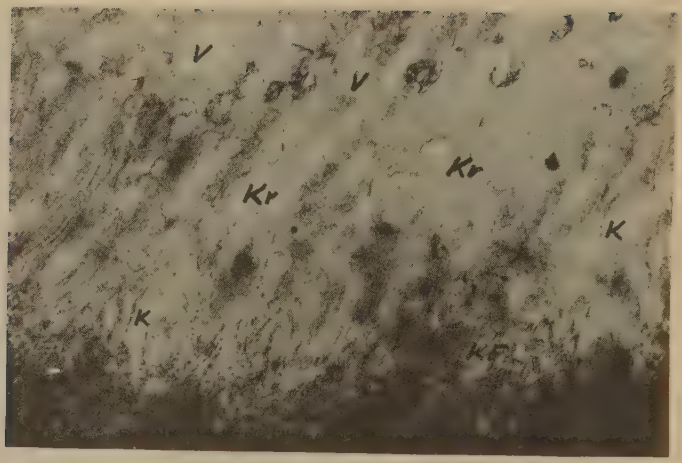


Abb. 10: Dentinkanal an der Resorptionsfront, Obliteration durch Mineralisierung in Form feiner nadelförmiger Kristalle (K).
Vergrößerung: 20000 : 1

Abb. 11: Odontoklast an der Dentingrenze (Okl), zwei angeschnittene Zellkerne (N), Mitochondrien (M), einzelne Kollagenfasern innerhalb der demineralisierten Zone,(KF), glatter Zellrand.
Vergrößerung: 8000 : 1



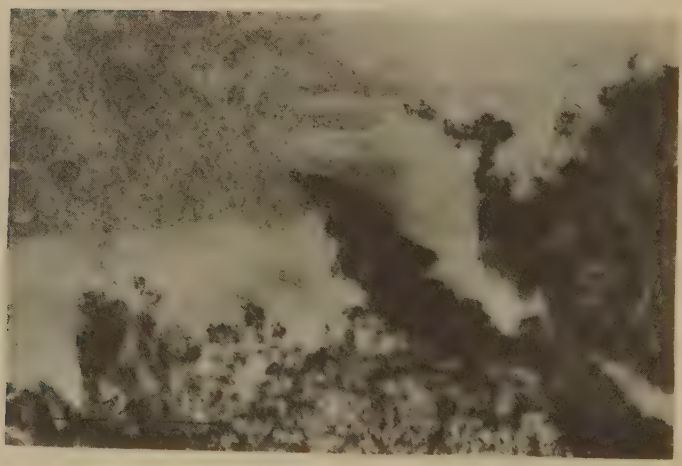


Abb. 12: Cytoplasmatische Zellfortsätze in Form der "brush border", kryptenartige Erweiterungen zwischen den Zellfortsätzen (Kr), Vakuolen (V), zwischen den Fortsätzen gelegene Kristalle (K), vereinzelte Fasern (KF). Vergrößerung: 20000 : 1

Abb. 12a: Odontoklast mit wenigen cytoplasmatischen Fortsätzen, sonst glatter Zellbegrenzung,

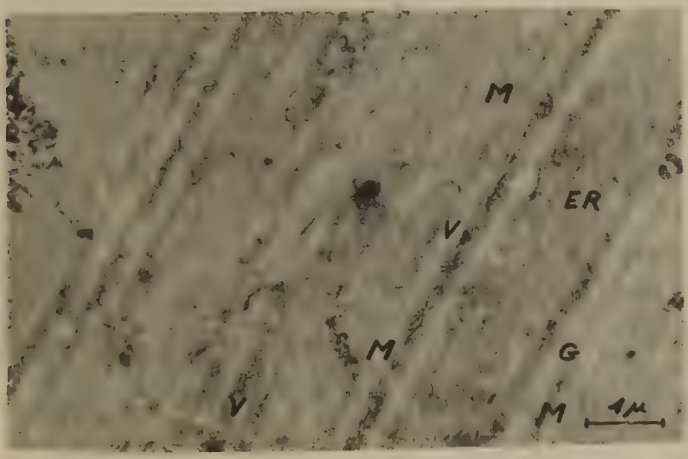


Abb. 13: Cytoplasmatische Fortsätze verschiedener Zellen, ungeordnet ineinandergreifend.
Vergrößerung: 20000 : 1

Abb. 14: Typische massiert auftretende Mitochondrien (M) eines Odontoklasten, Vakuolen (V), endoplasmatisches Retikulum (ER), Golgiapparat (G).
Vergrößerung: 8000 : 1

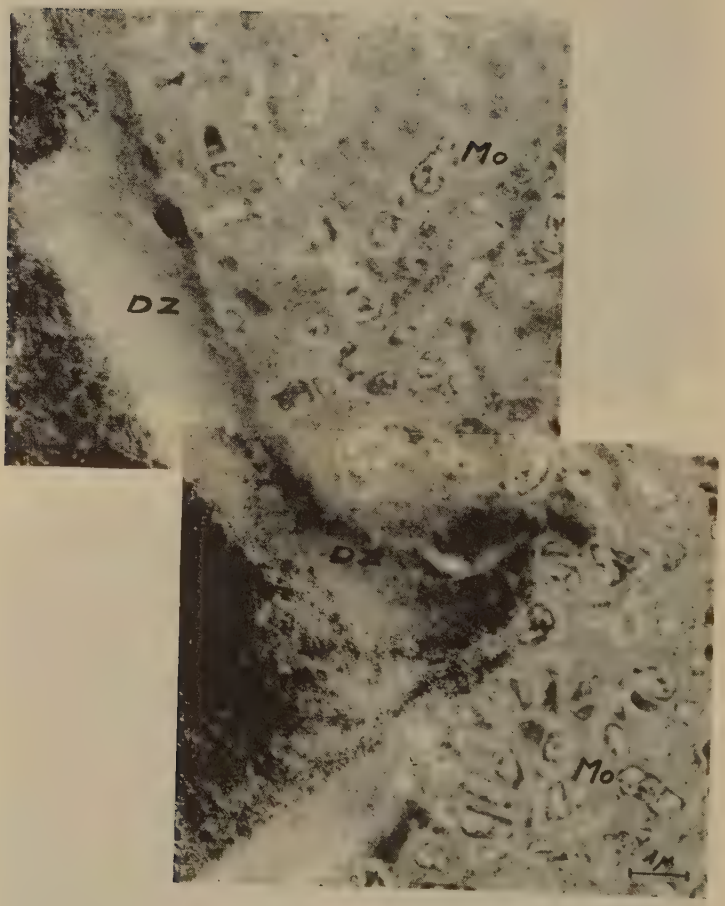


Abb. 15: Resorptionsfront eines über das Periodontium infizierten Milchzahnes, Mikroorganismen (Mo), demineralisierte Zone (DZ). Vergrößerung: 6000 : 1

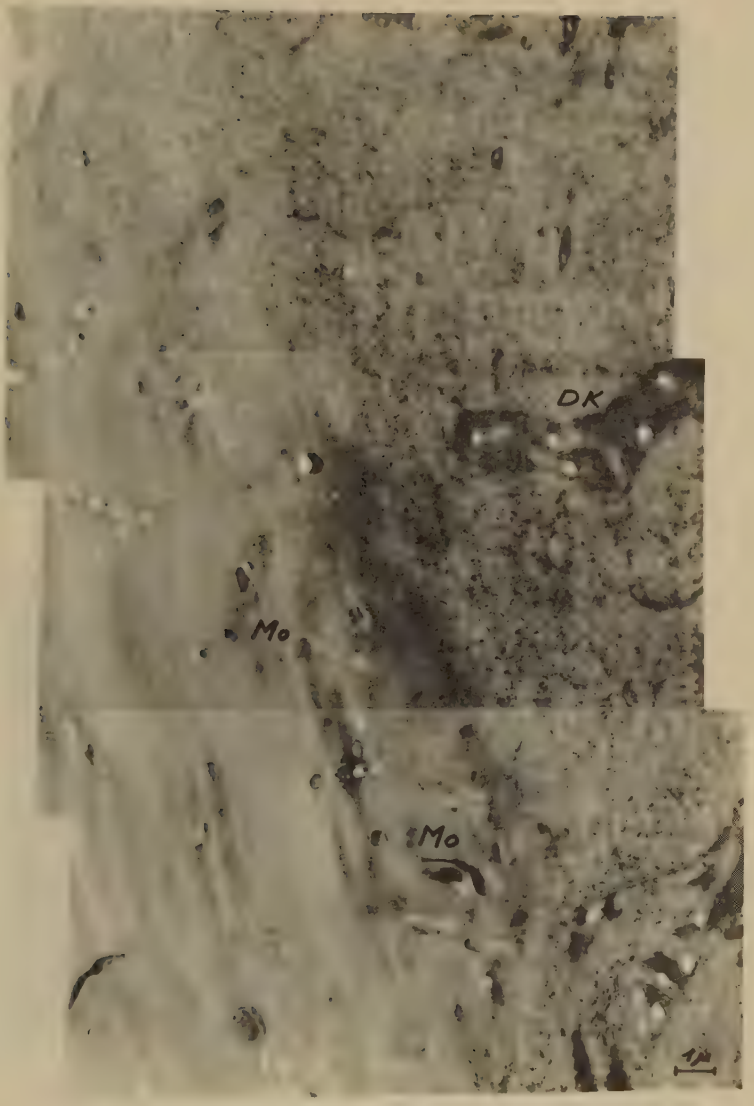


Abb. 16: Resorptionsfront eines gangränösen Milchzahnes, typische Anlagerung und Durchsetzung des Dentins mit Mikroorganismen (Mo), Dentinkanal (DK), bereits weitgehende Demineralisation der Hartsubstanz.
Vergrößerung: 4000 : 1

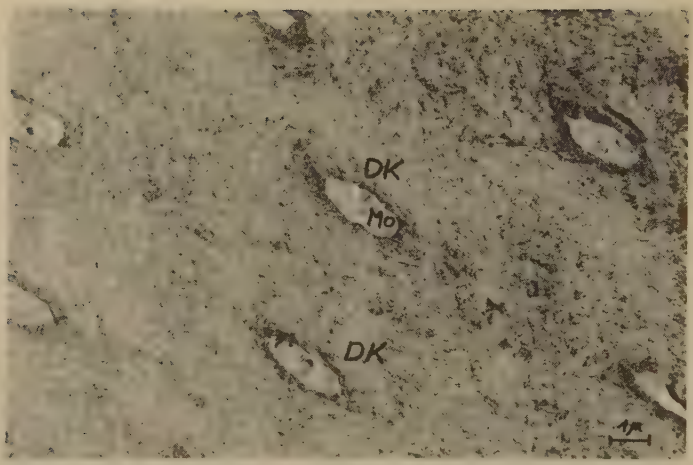


Abb. 17: Quergeschnittene Dentinkanäle (DK), angefüllt mit Mikroorganismen (Mo), Schnitttiefe ca. 1mm von der Resorptionsfront. Vergrößerung: 4000 : 1

Abb. 18: Die größere Vergrößerung zeigt eine verstärkte peritubuläre Zone (PZ) und die partiell entmineralisierte Grundsubstanz, im Kanal Mikroorganismen (Mo).

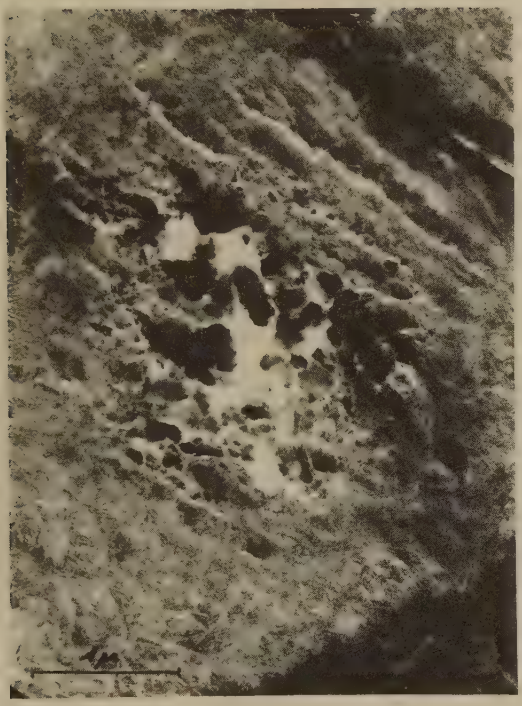


Abb. 19: Weitgehend eingeengter Dentinkanal mit whitlockit- ähnlichen Kristallen.
Vergrößerung: 16000 : 1

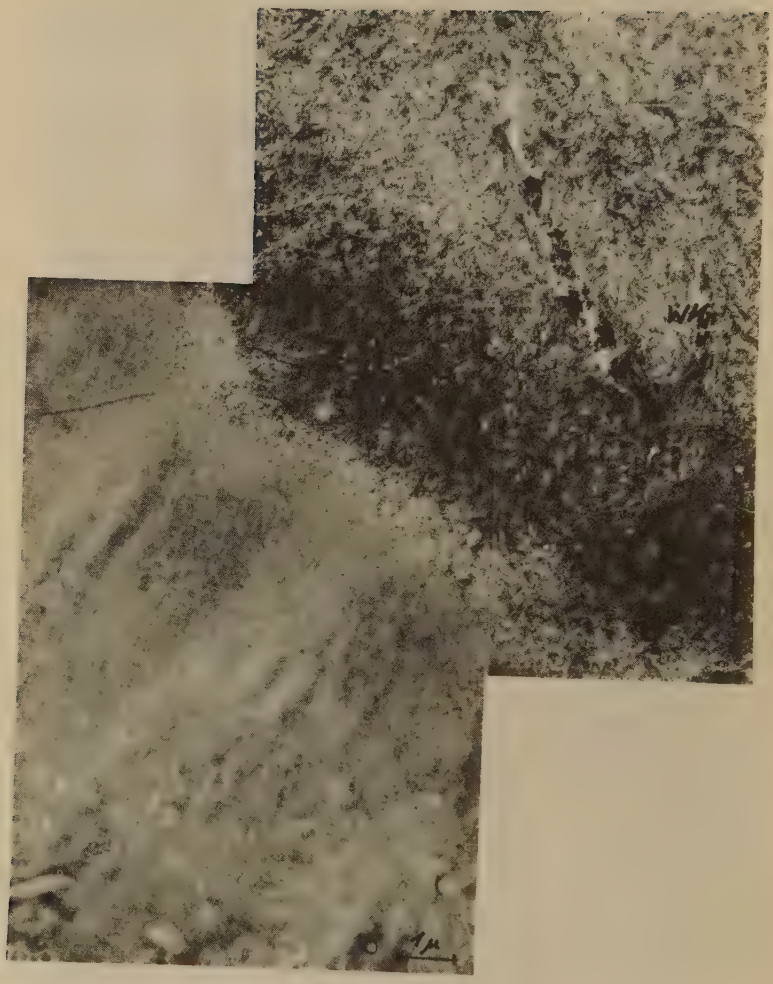


Abb. 20: Ein mit WHITLOCKIT- Kristallen (WK) gefüllter Dentinkanal, ca. 5,5 u von der Resorptionsfront entfernt.
Vergrößerung: 6000 : 1

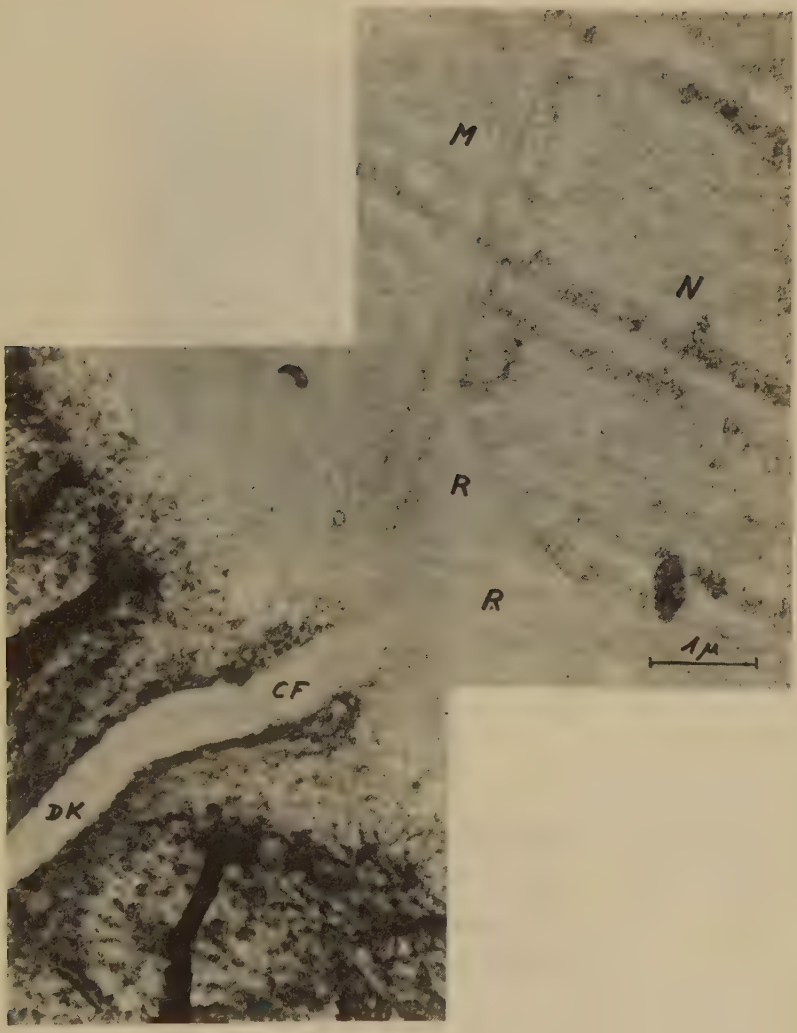


Abb. 21: Teil eines Odontoklasten im Bereich eines Dentinkanals (DK), in diesen Kanal ragt ein cytoplasmatischer Fortsatz der Zelle (CF), Ribosomen (R), Nukleus (N), Mitochondrien (M).

Vergrößerung: 12000 : 1

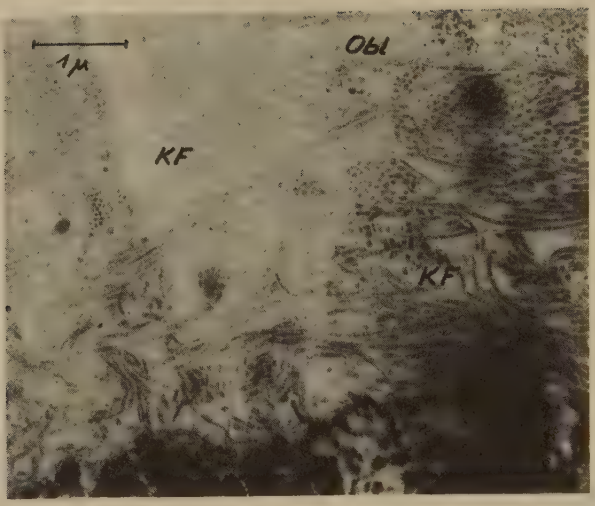


Abb. 22: Reparationszone an der Dentingrenze, quergestreifte kollagene Fasern (KF) längs und quer geschnitten, Odontoblastengrenze (Obl). Vergrößerung: 10000 : 1

Herrn Professor Dr. med. dent. Hans Lenz möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung des Themas und die bei der Durchführung der Arbeit gewährte Anleitung danken.

Mein besonderer Dank gilt Fräulein Helga Lindner, die mich mit der Präparationstechnik vertraut machte und bei den technischen Arbeiten jederzeit unterstützte.

L e b e n s l a u f

Am 2. Mai 1941 wurde ich, Klaus Schwinge, als Sohn des Diplom-Landwirtes Hugo Schwinge und seiner Ehefrau Rosemarie geb. Alves in Zimpel-Tauer/Schlesien geboren. Nach der Flucht aus Schlesien wurde ich 1947 in Hemmingen/Hannover eingeschult und besuchte anschließend die Pestalozzi-Schule in Verden/Aller. 1951 bestand ich die Aufnahmeprüfung für das Domgymnasium Verden, an dem ich 1961 die Reifeprüfung ablegte. Anschließend leistete ich bis 1962 meinen Wehrdienst bei der Bundeswehr ab.

Zum Wintersemester 1962/63 erhielt ich an der Freien Universität Berlin die Zulassung zum Studium der Zahnmedizin. Im April 1965 bestand ich die zahnärztliche Vorprüfung und beendete im Februar 1968 das Studium mit der zahnärztlichen Prüfung. Seit dieser Zeit bin ich als Assistenzzahnarzt in einer zahnärztlichen Praxis in Berlin tätig.